

Т. А. ВОСТРОКНУТОВ

К МЕТОДИКЕ ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ ПОИСКОВОЙ ГЕОХИМИИ

К настоящему времени разработан широкий комплекс методов обработки данных поисковой геохимии, позволяющих решать разнообразные задачи геохимического прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых [4, 7, 8, 27, 28, 31, 33]. Однако дальнейшее повышение эффективности поисковой геохимии диктует необходимость в совершенствовании методики ее исполнения, в том числе и методов обработки данных. Основными направлениями совершенствования методов обработки, по нашему мнению, являются:

1) повышение эффективности и надежности выделения рудогенных геохимических аномалий, в особенности слабо проявленных, обусловленных глубокозалегающими рудными объектами;

2) повышение достоверности интерпретации и прогнозно-поисковой оценки аномалий, включая прогнозы типа, пространственного залегания и масштабов (ресурсов) ожидаемых месторождений полезных ископаемых;

3) повышение оперативности и автоматизации процессов обработки геохимических данных;

4) расширение круга решаемых задач, в частности, разработка новых эффективных методов геохимического картирования геологических объектов, в том числе околорудных геохимических ореолов.

Учитывая вышесказанное, необходимо стремиться к разработке определенного оптимального набора разных методов. При этом иерархия методов (от простых к сложным) будет в значительной мере определяться иерархией уровней содержания элементов-индикаторов оруденения в природных объектах. С этих позиций весь диапазон изменчивости содержания элементов в литосфере предложено разделять на пять стандартизированных уровней [21, 22]: рудный, рудогенный, литорудогенный (положительный и отрицательный), литогенный. Эти уровни (кроме отрицательного лито-рудогенного) сопоставимы с типами минерализаций пород [26]. Отнесение содержания к определенному уровню производится исходя из соотношений литогенной (обусловленной процессами породообразования) и рудогенной (обусловленной процессами ореоло- и рудообразования) составляющих. Так, самый высокий (рудный) уровень определяется практической ценностью содержания рудообразующих элементов и начинается с их принятого бортового содержания в рудах.

Следующий по убыванию интенсивности уровень — рудогенный — имеет пределами с верхней стороны бортовые содержания элементов в ру-

Уровни содержаний элементов в породах

Элемент	Порядок единиц измерения, вес %	Кларковский (литогенный)	Рудогенный	Рудный		Элемент	Порядок единиц измерения, вес %	Кларковский (литогенный)	Рудогенный	Рудный	
				бортвой	промысленный					бортвой	промысленный
10x Cu	10 ⁻³	5	40	250	800	1 Tl	10 ⁻⁴	0,6	4	18	80
Zn	10 ⁻³	6	60	800	2200	2 Ge	10 ⁻⁴	1	8	40	80
Cd	10 ⁻⁴	0,2	4	90	400	3 Sn	10 ⁻³	0,2	2,5	60	250
Pb	10 ⁻³	1	12	400	1600	4 Mo	10 ⁻⁴	1	10	100	400
Ag	10 ⁻⁶	0,6	18	400	1600	4 W	10 ⁻⁴	2	18	400	1600
Au	10 ⁻⁶	0,45	8	100	400	4 Be	10 ⁻⁴	1	12	60	250
Hg	10 ⁻⁵	0,3	20	2000	8000	3 Li	10 ⁻³	2,5	12	60	300
As	10 ⁻³	2	13	400	1700	3 Rb	10 ⁻³	8	40	180	400
Sb	10 ⁻³	1	13	400	1700	4 Cs	10 ⁻⁴	2	40	400	1600
Bi	10 ⁻¹	0,15	2,5	400	1600	3 Y	10 ⁻³	2,5	12	60	250
Se	10 ⁻³	0,5	8	180	800	4 Yb	10 ⁻⁴	2,5	12	60	250
Te	10 ⁻⁶	0,1	40	800	4000	3 La	10 ⁻¹	3	18	80	250
Ga	10 ⁻³	1,5	8	40	90	3 Ce	10 ⁻³	6	26	120	250
In	10 ⁻⁴	0,15	1,6	8	40	3 ΣTR	10 ⁻³	12	56	250	600
Zr	10 ⁻³	5	80	400	2000	3 V	10 ⁻³	8	38	180	1000
Hf	10 ⁻⁴	2	25	120	300	2 Mn	10 ⁻²	8	80	400	1600
Nb	10 ⁻³	2	8	40	160	2 Cr	10 ⁻²	0,3	13	600	3000
Ta	10 ⁻⁴	2	8	40	160	3 Ni	10 ⁻³	2	55	250	800
Ba	10 ⁻²	1,5	18	80	400	3 Co	10 ⁻³	1	8	40	160
Sr	10 ⁻²	1,5	18	80	400	6 Pt	10 ⁻⁶	1	18	80	400
P	10 ⁻²	7	38	180	400	4 U	10 ⁻⁴	1	18	400	1600
F	10 ⁻¹	0,6	2,6	50	200	3 Th	10 ⁻³	0,6	8	60	250
B	10 ⁻³	2	40	800	4000	1 S	10 ⁻¹	0,3	32	50	150
Sc	10 ⁻³	1,5	5,5	25	100	0 Fe	10 ⁰	5	10	14	30
Ti	10 ⁻¹	3	12	56	120	0 Al	10 ⁰	6	10	12	30

Примечание. При использовании данных таблицы следует учитывать возможные отклонения в кларковых, рудогенных и рудных уровнях содержаний, обусловленных конкретными геохимическими особенностями пород, руд, а также вероятными систематическими ошибками анализов.

дах, с нижней — их максимальные содержания в широко распространенных типах безрудных горных пород. Характерной особенностью рудного и рудогенного уровней является существенное (90—99 %) преобладание рудогенной составляющей содержаний над литогенной, что определяет практическую независимость от состава пород геохимических аномалий, отвечающих этим уровням содержаний элементов. Назовем подобные аномалии «явными» [33]. Им будут отвечать либо рудопроявления и месторождения соответствующих полезных ископаемых, либо интенсивно проявленные околорудные геохимические ореолы, обычно формирующиеся в рудовмещающих комплексах пород, либо (при широком распространении и слабом проявлении геохимической зональности) металлогенически специализированные толщи. Для выделения явных аномалий, как правило, не нужен учет местного геохимического фона; достаточно задать бортовые содержания рудного уровня и граничные содержания рудогенного уровня, которые будут аномальны по отношению к любым типам безрудных пород (см. таблицу). Для выделения «явных» аномалий в других природных объектах достаточно задать граничные уровни содержаний, аномальные по отношению к любым типам безрудных природных объектов, где предполагается обнаружение рудного рассеяния.

Применительно к выделению «явных» аномалий были разработаны

простые и экспрессные методы обработки геохимических данных путем «голосования» индикаторных содержаний элементов [18, 19] и балльных оценок содержаний различных стандартизированных уровней [21, 22], позволяющие уже в процессе полевых работ по мере поступления аналитических данных оперативно обнаруживать рудопроявления различных полезных ископаемых и интенсивно проявленные околорудные ореолы. Геохимическая специализация оруденения и ореолов устанавливается при этом по ассоциациям элементов рудного и рудогенного уровней содержаний. Интенсивность развития оруденения определяется величиной коэффициентов минерализованности (КМ), а пространственное положение — значениями коэффициентов зональности (КЗ):

$$KM_r = \sum_{j=1}^{m_p} \Gamma_j / m_p \quad (1)$$

$$KM_6 = \sum_{j=1}^{m_p} B_j / 10 \cdot m_p \quad (2)$$

$$KZ_r = \frac{\sum_{\phi}^{m_{\phi}} \Gamma_{\phi} - \sum_{\tau}^{m_{\tau}} \Gamma_{\tau}}{\left| \sum_{\phi}^{m_{\phi}} \Gamma_{\phi} \right| + \left| \sum_{\tau}^{m_{\tau}} \Gamma_{\tau} \right| + \left| \sum_{p}^{m_p} \Gamma_p \right|} \quad (3)$$

$$KZ_6 = \frac{\sum_{\phi}^{m_{\phi}} B_{\phi} - \sum_{\tau}^{m_{\tau}} B_{\tau}}{\left| \sum_{\phi}^{m_{\phi}} B_{\phi} \right| + \left| \sum_{\tau}^{m_{\tau}} B_{\tau} \right| + \left| \sum_{p}^{m_p} B_p \right|} \quad (4)$$

где Γ_j — «голоса», B_j — балльные оценки содержаний j -го элемента-индикатора, m — число элементов рудообразующей ассоциации; ϕ , τ , p — заданные фронтальная, тыловая и рудообразующая ассоциации элементов-индикаторов; KM_r , KZ_r , KM_6 , KZ_6 — коэффициенты, вычисленные методами «голосования» (г) и балльных оценок содержания (б).

Как следует из формул (1—4), величина КМ меняется от 0 до 1, обычно принимая значения от 0,05—0,1 до 0,3—0,4 в пределах околорудных ореолов и $\geq 0,4$ —0,5 в пределах оруденения; КЗ изменяется от +1 до -1, принимая значения $\geq +0,3 \pm 0,1$ в пределах фронтальных, от $0,3 \pm 0,1$ до $-0,3 \pm 0,1$ в пределах околорудных (центрально-рудных) и $\leq -0,3 \pm 0,1$ в пределах тыловых сечений ореолов (оруденения). Нарастание значений КМ с одновременным уменьшением величин КЗ интерпретируется как «приближение» проб к искомому оруденению (с надрудной стороны при $KZ > 0$ или подрудной $KZ < 0$).

Карты и разрезы, построенные по совмещенным значениям КМ и КЗ, отображают пространственно разные сечения околорудных ореолов (руд) различных рудных формаций, давая достаточно наглядное представление о структурной позиции оруденения и его околорудных ореолов.

¹ Могут рассчитываться также комплексные геохимические показатели ореолов и зональности (КП):

$$KP_r = \frac{\sum^{m_+} \Gamma_j + \sum^{m_-} \Gamma_j (-)}{\sqrt{m_+ + m_-}} \quad \text{или} \quad KP_6 = \frac{\sum^{m_+} B_j + \sum^{m_-} B_j (-)}{\sqrt{m_+ + m_-}}$$

где Γ_j (—) или B_j (—) «голоса» или баллы «элементов» из заданной ассоциации, знак которых при сложении изменяется на противоположный.

лов, геохимическая специализация которых ранжируется (по баллам) спектрами элементов-индикаторов.

Большие сложности представляют выделение и интерпретация «неявных» геохимических аномалий на лито-рудогенных уровнях содержания элементов, где литогенная и рудогенная составляющие находятся в переменных и близких друг к другу количествах. Для достаточно надежного выделения рудогенной составляющей обычно требуется соответствующий статистический (или пространственно-статистический) учет местного безрудного геохимического фона, который может быть дифференцирован по типам пород, ландшафтов, почв и т. п. Экспрессное выделение «неявных» аномалий может быть произведено вышеуказанными методами «голосования» и балльных оценок содержания, но с необходимыми уточнениями значений индикаторных уровней или балльных оценок содержания относительно местного геохимического фона.

Наиболее корректно задача выделения «неявных» аномалий решается путем нормирования содержания по параметрам местного фона. Разработаны теоретические основы и методика нормирования содержания заданного множества элементов в природных объектах для моделей случайных величин или случайных функций некоторых пространственно-временных координат [13]. В простейшем случае единичные (Z_{ji}) и интегральные (Z_i^u) нормированные оценки содержания вычисляются по формулам:

$$\bar{Z}_{ji} = \frac{X_{ji} - \bar{X}_j}{S_{xj}} \quad (5)$$

$$Z_i^u = \frac{\sum_{j=1}^m Z_{ji}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m r_{j/j+1}}} \quad (6)$$

где X_{ji} — нормализованные содержания (С) j элемента в i пробе (например, $X = \lg C$); \bar{X} и S_x — параметры эталонного объекта (обычно местного фона), относительно которого производится нормирование; $r_{j/j+1}$ — коэффициенты парной корреляции между значениями X_j и X_{j+1} заданной ассоциации из m элементов. Аномалии выделяются, если $Z_{ji} \geq Z_q$ и $Z_i^u \geq Z_q^u$, где Z_q и Z_q^u — заданные критические пределы выделения аномалий с надежностью q .

Разработаны методы нормирования для сложных нелинейных распределений содержания элементов и предложены формулы расчета значений Z_j при условии постоянства q на принятую единицу площади с учетом масштаба (густоты) геохимического опробования [12]. Показана эффективность применения методов нормирования не только литохимических, но и гидрохимических данных [17].

Математические операции с нормированными оценками содержания более корректны и позволяют вычислять комплексные геохимические критерии интерпретации аномалий эффективнее, чем критерии, вычисленные по исходным содержаниям или их центрированным (по фону или кларкам) величинам [27, 29]. При этом подходе все возможные ошибки формально-статистической оценки параметров эталонных (например, фоновых) распределений автоматически переходят на нормированные величины содержания, искажая представления о надежности, эффективности и контрастности геохимических аномалий.

Наиболее сложную проблему представляет обнаружение «скрытых» аномалий на литогенном (субкларковом или субфоновом) уровне содержаний элементов, когда доля их литогенной составляющей существенно выше (90 % и более) рудогенной составляющей. В тех случаях, когда возникает потребность выделения подобных «скрытых» рудогенных аномалий, фиксирующих внешне, наиболее удаленные части ореолов глубокозалегающих месторождений (рудных тел), необходимо использовать тонкие и сложные математические методы, основанные главным образом на различиях корреляционных функций содержаний элементов-индикаторов на рудном и безрудном участках. Установлено, что на максимальном удалении от рудных тел (в зоне так называемого субфонового ореола) наблюдаются аномальные значения автокорреляций, взаимных корреляций и дисперсий содержаний, отображающие локальную перегруппировку рудосоставляющих и сопутствующих элементов под влиянием ореолообразующих процессов [5]. Средние содержания элементов в этих частях ореолов практически неотличимы от фоновых значений.

Другим путем выделения «скрытых» аномалий может быть использование специальных приемов геохимических исследований, основанных на различных форм нахождения рудогенной и литогенной составляющих содержаний элементов-индикаторов оруденения. Проведение частично-фазовых анализов, связанных с химической или электрохимической экстракцией преимущественно рудогенной составляющей содержаний [2, 32], получением и исследованием различного рода минеральных концентратов и монофракций [3, 27], позволяет надежно выявлять «скрытые» геохимические аномалии. Доказано, что выделение «скрытых» аномалий позволяет увеличить эффективные размеры околорудных ореолов в два-три раза и более, обеспечивая максимально возможную (в данных условиях) глубинность соответствующих методов геохимических поисков и максимальную допустимую разреженность сети (интервалов) геохимического опробования.

Для интерпретации выделенных геохимических аномалий, наряду с рассмотренными выше коэффициентами минерализованности и зональности ореолов (оруденения), рекомендуется использовать предложенные нами [24] новые комплексные геохимические критерии интерпретации — нормированные оценки рудоносности (НОР) и их производные в виде показателей зональности (ПЗ) и прогнозных запасов металлов (ПЗМ). Нормированные оценки рудоносности, вычисляемые по формулам, аналогичным вышеприведенным (5, 6)², позволяют одновременно и математически строго учесть такие показатели оруденения, как нарастание средних содержаний, увеличение дисперсий содержаний и усиление корреляционных связей рудо- и ореолообразующих элементов-индикаторов. Все они, как следует из формул (5, 6), уменьшают значения Z_{pj} и Z_p^u , увеличивая соответственно вероятности встречи рудных содержаний элементов-индикаторов (P_{pj}) и их заданных ассоциаций (P_p^u), так как

² При вычислении Z_{pj} в формулу (5) вместо X_{ij} подставляются заданные нормализованные значения рудных содержаний j элемента (X_{rj}), а X , S_x и r соответствуют параметрам распределения и связей X в пределах интерпретируемой аномалии; значения P_{pj} и P_p^u могут быть определены по таблицам [6] для величин Z_{rj} или $Z_p^u \leq |5|$.

$$P_{p_j} = 1 - F(Z_{p_j}), \quad (7)$$

а

$$P_p^u = 1 - F(Z_p^u). \quad (8)$$

где $F(Z)$ представляет собой известный интеграл вероятностей по Шепарду:

$$F(Z) = 1/2 \sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-z^2/2} dz. \quad (9)$$

С помощью НОР и их производных могут быть решены задачи по оценке потенциальной рудоносности пород (структур), определению типа оруденения, зональности оруденения и околорудных ореолов, оценке прогнозных запасов (ресурсов) металлов.

Правильное применение НОР и методов нормирования требует соблюдения ряда условий. В первую очередь необходимы предварительная нормализация распределений содержаний элементов, а также исключение влияния погрешностей работ. Предложено нормализовать содержания элементов на основе модели обобщенного логнормального распределения. Разработаны методика оценки параметров неполностью определенных и искусственно усеченных распределений содержаний элементов, нередких в практической геохимии в основном из-за недостаточной чувствительности аналитических методов, а также методика обоснования сходства или различий между статистиками геохимических признаков на основе графоаналитического исследования их доверительных интервалов [9, 10, 13, 14]. Составлены программы по автоматизации расчетов статистик полных и неполностью определенных выборок на ЭВМ и по нормированию содержаний элементов [15, 16]. Исследованы величины аналитических погрешностей и показано их искажающее влияние на наблюдаемые параметры распределений и связей содержаний элементов. Предложены методы введения поправок на погрешности работ в вычисленные значения параметров распределений и связей [11; 25].

В последнее время разработаны методы выделения геохимических аномалий по естественным (природным) аномалиеобразующим ассоциациям элементов-индикаторов и разграничения упорядоченных совокупностей геохимических проб по комплексным геохимическим показателям. На основе этих методов составлена и эксплуатируется в ИВЦ УПГО первая очередь преобразующе-интерпретационного комплекса программ обработки геохимической информации на ЭВМ ЕС-1022 («ПИКПО — ГЕОХИ-1»). В основу методов положено стандартизированное преобразование содержаний элементов (C_j) в условные балльные оценки (B_j), эквивалентные условным энергиям рудообразования (E_{yj}) по [30], увеличенным в десять раз ($B_j = 10 \cdot E_{yj}$). Для вычисления B_j предложена формула

$$B_j = 10 \cdot [\lg(C_j/C_{kj}) / \lg(C_{pj}/C_{kj})], \quad (10)$$

где C_{kj} и C_{pj} — заданные кларковые и промышленные (рудные) содержания j элемента.

Как следует из формулы (10), балльные оценки представляют собой логарифмы кларков концентрации, нормированные относительно логарифмов заданных кларков промышленной (рудной) концентрации.

Такая нормировка обеспечивает одинаковость распределений B_j различных элементов в диапазоне от кларковых до рудных содержаний. Например, 0,00032 % Ag, 0,065 % Cu и 12,5 % Fe будут иметь (при кларках концентрации 53, 13 и 2,5 соответственно) одну и ту же балльную оценку содержаний, равную пяти.

Величины B_j характерны тем, что имеют нулевые значения при кларковых (фоновых) содержаниях различных элементов, а пределы изменчивости B_j в безрудных породах обычно не превышают $\pm 2 \div \pm 3$. Принимая во внимание теоретические возможные пределы изменчивости B_j от $-\infty$ до $+\infty$, можно допустить, что в большинстве случаев их распределения в пределах безрудных пород (или других безрудных объектов, для которых проведена аналогичная нормировка) могут быть удовлетворительно аппроксимированы моделью нормальных распределений — $N(0,1)$, для которых разработан мощный аппарат математической статистики. Сопоставимость значений B_j по разным элементам обеспечивает корректность математических операций между ними, необходимых для вычислений комплексных критериев интерпретации геохимических данных.

Так, при расчетах суммарного аномального эффекта в виде коэффициентов аномальности (КА) предложены формулы:

$$KA_{\max} = \max \left(\frac{\sum_{j=1}^{m+} B_j > 0}{\sqrt{m_+}} \right) \quad (11)$$

$$KA_{\min} = \min \left(\frac{\sum_{j=1}^{m-} B_j < 0}{\sqrt{m_-}} \right) \quad (12)$$

где KA_{\max} и KA_{\min} — максимальные и минимальные значения КА для положительных (+) и отрицательных (−) балльных оценок (B_j) соответственно, полученные при последовательном сложении убывающих по модулю величин B_j ; m_+ и m_- — количества элементов, при которых достигается экстремум значений КА³.

Геохимические аномалии выделяются при значениях

$$|KA| \geq KA_q^m \quad (13)$$

где KA_q^m — заданные граничные пределы выделения аномалий (для ассоциации из m элементов).

Ассоциации элементов, ранжированных по убыванию величин $|B_j|$ и определяющих значения KA_{\max} и KA_{\min} , названы основными аномалиеобразующими. После их исключения по оставшемуся набору элементов повторяются расчеты по формулам (11, 12), выделяются при неравенстве (13) аномалиеобразующие ассоциации второго порядка и т. д. Таким путем выделяются моно- и полиэлементные положительные и отрицательные геохимические аномалии по естественным аномалиеобразующим ассоциациям элементов.

Если в каждой пробе значения $|KA| < KA_q^n$, то возможно выделение слабых аномалий из n рядом расположенных проб путем расчетов аналогичных коэффициентов аномальности (KA^n):

³ Так как средние и дисперсии величин КА зависят от числа слагаемых B_j , в программном комплексе разработаны и реализованы методы их сведения к распределениям $N(0,1)$.

$$KA_{\pm}^{\max} = \max \left(\sum^{n_{\pm}} KA_{\pm} \max \sqrt{n_{\pm}} \right), \quad (14)$$

$$KA_{\pm}^{\min} = \min \left(\sum^{n_{\pm}} KA_{\pm} \min / \sqrt{n_{\pm}} \right). \quad (15)$$

Аномалии выделяются при неравенствах $|KA^n| \geq KA_q^{m,n}$.

Задание критических уровней $KA_q^{m,n}$ зависит от принятой стратегии поведения геохимика, количеств m и n , авто- и взаимных корреляций элементов в пределах безрудных объектов и околорудных ореолов. Обычно значения KA_q колеблются от 3—4 до 5—7. Внешние границы аномалии, как правило, проводятся по значениям $|KA| \geq 2$, а эпицентры выделяются по максимальным значениям $|KA|$ в каждом оконтуренном сечении аномалии (ореола).

Пространственная изменчивость величин KA и аномалиеобразующих ассоциаций элементов на планах и разрезах дает наглядное представление о морфологии, размерах, эпицентрах геохимических аномалий, их геохимической зональности. Расчеты KM и KZ по формулам (2, 4) дают количественную характеристику уровней минерализованности и пространственной зональности аномалий, отвечающих заданным эталонным типам околорудных геохимических ореолов (например, эндогенных ореолов медноколчеданных месторождений).

Рассчитывая статистики распределений и связей B_j в пределах выделенных аномалий (\bar{B}_j ; S_{B_j} ; $r_{B_{j/i+1}}$), можно определить нормированные оценки рудоносности по формулам, аналогичным (5, 6) для заданных пределов рудоносности, также выраженных в условных баллах (например, для $B_{jp} = 10$).

С использованием величин B_j успешно решаются задачи расчленения и корреляции геохимических разрезов по комплексу геохимических данных. Составлены алгоритмы и программы решения данных задач на ЭВМ, в основу которых положено попарное сравнение значений B_j и их упорядоченных (ранжированных) совокупностей в соседних пробах или попарно сравниваемых групп проб, из которых одна принята в качестве условного эталона. Так, расчеты комплексного критерия различий (ZM) производятся по формуле, аналогичной (11):

$$ZM_{\max} = \max \left(\sum^m |Z_{j, i/i+1}| / \sqrt{m} \right), \quad (16)$$

где

$$Z_{j, i/i+1} = (B_{j, i} - B_{j, i+1}) / \sqrt{2}. \quad (17)$$

а $B_{j, i}$ и $B_{j, i+1}$ — балльные оценки содержаний j элемента в i и $i+1$ сравниваемых (обычно соседних) пробах.

Различия признаются значимыми, если

$$ZM_{\max} \geq ZM_q^m, \quad (18)$$

где ZM_q^m — заданный критический предел различий (обычно равный 3—4 и более). Элементы, определяющие значения ZM_{\max} и ранжированные по убыванию величины $Z_{j, i/i+1}$, образуют при неравенстве (18) геохимически различающую ассоциацию. После их исключения расчеты повторяются до тех пор, пока будет обеспечиваться неравенство (18).

Комплексный критерий подобия (RO) рассчитывается по формуле коэффициента ранговой корреляции Спирмэна [6]. Все значения, отвечающие неравенству

$$RO < RP, \quad (19)$$

где RP — заданный критический уровень RO , отражают геохимическое неподобие проб. В этих случаях последовательно исключаются элементы с максимальными различиями рангов до тех пор, пока не будет обеспечено неравенство

$$RO \geq RP$$

или не исчерпаются все элементы (точнее, до $m < 3$). Элементы, определяющие неравенство (19) и упорядоченные по убывающим различиям рангов, образуют ассоциацию геохимического неподобия.

По соотношениям ZM_{\max} и RO с заданными критическими уровнями проводятся три рода границ между пробами, отвечающие: 1) геохимически неподобным пробам с близкими уровнями содержаний (граница 1-го рода при $ZM_{\max} < ZM_q^m$ и $RO < RP$); 2) геохимически подобным пробам с различными уровнями содержаний (граница 2-го рода при $ZM_{\max} \geq ZM_q^m$ и $RO \geq RP$); 3) геохимически неподобным и различным по уровням содержаний пробам (граница 3-го рода при $ZM_{\max} \geq ZM_q^m$ и $RO < RP$). Обычно границы 1-го рода разделяют взаимно-независимые пробы, в которых содержания отвечают модели случайных чисел, разделенных с одинаковыми параметрами. Границы 2-го рода отражают развитие нестационарных (по координате упорядочивания проб) случайных процессов, например, пространственную изменчивость состава однотипных пород или градиентный характер распределения содержаний в ореолах. Границы 3-го рода обычно означают смену различных геохимических процессов и отвечают границам разных пород, ореольных зон, типов руд и т. п.

Геохимическая корреляция разрезов на основе рассмотренных принципов позволяет пространственно увязать соседние сочетания ореолов руд, частей разреза. В данном случае используется метод последовательного сравнения одной части разреза с другой, принятой в качестве «эталонной», с вычислением критериев различий и подобия. Части разреза, отвечающие минимальным различиям и максимальному подобию по заданным критериям, очевидно, будут в наибольшей степени подходить друг к другу. Таким образом могут быть установлены наиболее вероятные пути (каналы) миграции рудо- и ореолообразующих элементов.

Практическое применение рассмотренных методов обработки геохимических данных уже позволило решить ряд важных задач поисковой геохимии. На основе методов «голосования» разработаны комплексные критерии геохимической диагностики бурых железняков с выделением среди них железных шляп сульфидных (преимущественно колчеданных) месторождений [20]; методы петрохимической и геохимической диагностики магматических пород и кимберлитов [23]; выделения и оценки пространственно-различных сечений эндогенных ореолов колчеданных и иных рудных месторождений [19]. На основе методов нормирования и нормированных оценок рудоносности выделен и проинтерпретирован ряд рудоперспективных геохимических аномалий, впоследствии на участках некоторых из них были выявлены рудные объекты [1]. Применение стандартизированных уровней и

балльных оценок содержаний позволило существенно повысить оперативность выделения и надежность интерпретации «явных» геохимических аномалий, включая рудопроявления, и создать иерархию методов (от простых к сложным) для наиболее рационального изучения и обработки геохимических данных в зависимости от уровней содержаний элементов-индикаторов.

Преобразование содержаний в новые, одинаково распределенные величины (балльные оценки содержаний), создали основу для достаточно корректного вычисления различных комплексных геохимических критериев, позволяющих решать разнообразный круг задач геохимических поисков и картирования. На основе разработанных методов и алгоритмов в настоящее время составлен комплекс программ, позволяющий автоматизировать решение этих задач с помощью ЭВМ и включить их в общую систему программно-логического аппарата СУДБ — LEADER, разработанного в ИВЦ ПГО «Севзападгеология» и рекомендованного Министерством геологии РСФСР в качестве типовой системы АСОИ для отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алч-Заде С. А., Рожкова Д. А., Рязанов С. А., Хананьев В. Н. Геохимические методы при прогнозировании и поисках скрытых рудных месторождений в Азербайджане. — В кн.: Геохимические методы поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Новосибирск, 1980, с. 138—148.
2. Антропова Л. В., Велигура И. Д., Гольдберг И. С. Методы МПФ и ЧИМ для обнаружения рудных зон под рыхлыми отложениями. — В кн.: Методика и техника разведки. М., 1975, с. 21—24.
3. Баранов Э. Н., Засухин Г. Н., Карпухина В. С. и др. О формах нахождения меди, цинка, свинца и других элементов в пиритах из ореолов колчеданных месторождений. — Геохимия, 1972, № 10, с. 1245—1256.
4. Баус А. А., Григорян С. В., Ойзерман М. Т. Руководство по предварительной математической обработке геохимической информации при поисковых работах. М.: Недра, 1965. 118 с.
5. Богущезский Э. М., Гуревич В. Л., Рожкова Г. Ф., Фомичев Ю. М. Использование статистических характеристик полей концентраций полезных компонентов для решения прикладных задач поисков и разведок рудных месторождений. — В кн.: Математические методы при прогнозе рудоносности. М., 1977, с. 193—216.
6. Большев Л. Н., Смирнов Н. Г. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
7. Бондаренко В. Н., Верховская Л. А., Сорокина Е. П., Ключев О. С. Применение метода главных компонент для характеристики геохимических аномалий. — Сов. геология, 1975, № 8, с. 98—106.
8. Бугаев А. Н. Статистические методы принятия решений в задачах поиска и оценки пегматитов по геохимическим данным. — Геология и геофизика, 1968, № 12, с. 65—73.
9. Вострокнутов Г. А. Один из методов статистического исследования усеченных выборок в геохимии. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1969, № 9, с. 75—81.
10. Вострокнутов Г. А. Методы оценки статистических параметров распределения геохимических признаков по данным неполовностью определенных и усеченных выборок. — Геология и геофизика, 1971, № 1, с. 107—114.
11. Вострокнутов Г. А., Гавришин А. И. Использование методов статистики при анализе и обобщении геохимических данных. М.: Изд-во ВИЭМС, 1972. 36 с.
12. Вострокнутов Г. А. Некоторые статистические методы выделения геохимических аномалий. — В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений. М., 1972, с. 207—218.
13. Вострокнутов Г. А. Теоретические основы методов нормирования содержаний элементов при геохимических исследованиях. — Геохимия, 1972, № 4, с. 479—493.
14. Вострокнутов Г. А. Обоснование сходства или различий между статистиками геохимических признаков на основе графоаналитического исследования их доверительных интервалов. — Геология и геофизика, 1973, № 3, с. 101—109.